

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES  
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

529424

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
8. April 2004 (08.04.2004)

PCT

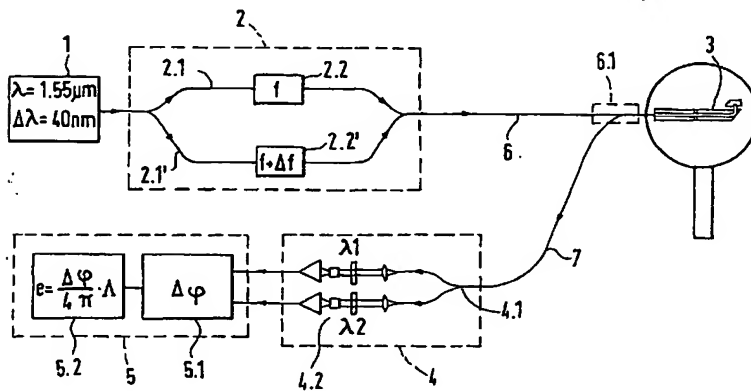
(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
WO 2004/029543 A2

- (51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>: G01B 9/02 (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): ROBERT BOSCH GMBH [DE/DE]; Postfach 30 02 20, 70442 Stuttgart (DE).
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE2003/001029
- (22) Internationales Anmeldedatum: 28. März 2003 (28.03.2003) (72) Erfinder; und (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): MARCHAL, Dominique [FR/CH]; Route de Bellevue 9, 1337 Vallorbe (CH). DUVOISIN, Marc-Henri [CH/CH]; Chemin de la Fontanne 6, 1028 Préverenges (CH). BREIDER, Dominique [FR/DE]; Ch. au Vernaz 4, CH-1112 Echichens (DE). DRABAREK, Pawel [DE/DE]; Parkstrasse 16/5, 75233 Tiefenbronn (DE).
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität: 102 44 552.4 25. September 2002 (25.09.2002) DE

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: INTERFEROMETRIC MEASURING DEVICE

(54) Bezeichnung: INTERFEROMETRISCHE MESSEINRICHTUNG



(57) Abstract: The invention relates to an interferometric measuring device for detecting the shape, roughness, and distance of the surface of an object (8) to be measured by means of a modulation interferometer (2) to which short coherent radiation is supplied by a source of radiation (1) and which comprises a first beam splitter (2.3) for splitting the supplied radiation into a first partial beam (2.1) that is guided across a first arm and a second partial beam (2.1') that is guided across a second arm. The light phase or light frequency of one of said partial beams is shifted relative to the other partial beam by means of a modulation device (2.2, 2.2'), said partial beam traveling

across a delay loop (2.9'), whereupon the partial beams are reunited at another beam splitter (2.10) of the modulation interferometer (2). The inventive interferometric measuring device also comprises a measuring probe (3) which is spatially separated from the modulation interferometer (2) and is or can be coupled thereto via a light-conducting fiber array (6). The reunited partial beams are split into a measuring beam and a reference beam in a partially permeable area (3.3) of a common arm of said measuring probe (3), and the measuring beam ( $r_1(t)$ ) reflected on the surface and the reference beam ( $r_2(t)$ ) reflected on a reference plane are superimposed therein. Said interferometric measuring device further comprises a receiver device (4) and an evaluation unit (5) for converting the radiation directed thereto into electrical signals and evaluating said signals based on a phase difference. A favorable design for taking reliable measurements even in tight hollow spaces is created by the fact that the partially permeable area (3.3) is formed by means of an exit area (3.31) of a probe fiber (3.1), which is slanted relative to the optical probe axis (3.5) by an exit angle ( $\alpha$ ), and an entrance area (3.32) of a fiber section that follows in the direction of the object, said entrance area also being slanted relative to the optical probe axis (3.5) by an entrance angle ( $\beta$ ). A cuneiform gap is formed between the exit area (3.31) and the entrance area (3.32).

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung bezieht sich auf eine interferometrische Messvorrichtung zum Erfassen der Form, der Rauheit oder des Abstandes der Oberfläche eines Messobjektes (8) mit einem Modulationsinterferometer (2), dem von einer Strahlungsquelle (1) kurzkohärente Strahlung zugeführt wird und das einen ersten Strahlteiler (2.3) zum Aufteilen der zugeführten Strahlung in einen über einen ersten Arm geführten ersten

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2004/029543 A2



(81) Bestimmungsstaaten (*national*): BR, CN, JP, US.

(84) Bestimmungsstaaten (*regional*): europäisches Patent (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR).

*Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.*

**Veröffentlicht:**

— *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts*

Teilstrahl (2.1) und einen über einen zweiten Arm geführten zweiten Teilstrahl (2.1') aufweist, von denen der eine gegenüber dem anderen mittels einer Modulationseinrichtung (2.2, 2.2') in seiner Licht-Phase oder Lichtfrequenz verschoben wird und eine Verzögerungsstrecke (2.9') durchläuft, und die anschließend an einem weiteren Strahlteiler (2.10) des Modulationsinterferometers (2) vereinigt werden, mit einer von dem Modulationsinterferometer (2) räumlich getrennten und mit dieser über eine Lichtleitfaseranordnung (6) gekoppelten oder koppelbaren Messsonde (3), in der die vereinigten Teilstrahlen in einem gemeinsamen Arm in einem teildurchlässigen Bereich (3.3) in einen Messstrahl und einen Referenzstrahl aufgeteilt und in der der an der Oberfläche reflektierte Messstrahl ( $r_1(t)$ ) und der an einer Referenzebene reflektierte Referenzstrahl ( $r_2(t)$ ) überlagert werden, und mit einer Empfängervorrichtung (4) und einer Auswerteeinheit (5) zum Umwandeln der ihr zugeleiteten Strahlung in elektrische Signale und zum Auswerten der Signale auf der Grundlage einer Phasendifferenz. Ein günstiger Aufbau für zuverlässige Messungen auch in engen Hohlräumen ergibt sich dadurch, dass der teildurchlässige Bereich (3.3) mittels einer bezüglich der optischen Sondenachse (3.5) unter einem Austrittswinkel ( $\alpha$ ) schrägen Austrittsfläche (3.31) einer Sondenfaser (3.1) und einer ebenfalls bezüglich der optischen Sondenachse (3.5) unter einem Eintrittswinkel ( $\beta$ ) schrägen Eintrittsfläche (3.32) eines objektseitig folgenden Faserabschnitts (3.2) gebildet ist, wobei zwischen der Austrittsfläche (3.31) und der Eintrittsfläche (3.32) ein keilförmiger Spalt gebildet ist.

### Interferometrische Messeinrichtung

Die Erfindung bezieht sich auf eine interferometrische Messvorrichtung zum Erfassen der Form, der Rauheit oder des Abstandes der Oberfläche eines Messobjektes mit einem Modulationsinterferometer, dem von einer Strahlungsquelle kurzkohärente Strahlung zugeführt wird und das einen ersten Strahlteiler zum Aufteilen der zugeführten Strahlung in einen über einen ersten Arm geführten ersten Teilstrahl und einen über einen zweiten Arm geführten zweiten Teilstrahl aufweist, von denen der eine gegenüber dem anderen mittels einer Modulations-  
einrichtung in seiner Licht-Phase oder Lichtfrequenz verschoben wird und eine Verzögerungsstrecke durchläuft, und die anschließend an einem weiteren Strahlteiler des Modulationsinterferometers vereinigt werden, mit einer von dem Modulationsinterferometer räumlich getrennten und mit diesem über eine Lichtleitfaseranordnung gekoppelten oder koppelbaren Messsonde, in der die vereinigten

5 Teilstrahlen in einem gemeinsamen Arm in einem teildurchlässigen Bereich in  
einen Messstrahl und einen Referenzstrahl aufgeteilt und wonach der an der  
Oberfläche reflektierte Messstrahl und der an einer Referenzebene reflektierte  
Referenzstrahl überlagert werden, und mit einer Empfängervorrichtung und einer  
Auswerteeinheit zum Umwandeln der ihr zugeleiteten Strahlung in elektrische  
10 Signale und zum Auswerten der Signale auf der Grundlage einer Phasendiffe-  
renz.

#### Stand der Technik

15 Eine derartige interferometrische Messeinrichtung ist in der DE 198 19 762 A1  
angegeben. Bei dieser bekannten Messeinrichtung ist ein Teil, das sogenannte  
Modulationsinterferometer, räumlich von der eigentlichen Messsonde getrennt  
und mit dieser optisch über eine Lichtleitfaseranordnung verbunden, so dass die  
20 Messsonde an sich als relativ einfach aufgebaute, leicht handhabbare Einheit  
ausgeführt werden kann. Dem Modulationsinterferometer wird eine breitbandige,  
kurzkohärente Strahlung zugeführt, die am Eingang des Modulationsinterfero-  
meters mittels eines Strahlteilers in zwei Teilstrahlen aufgeteilt wird, von denen  
der eine gegenüber dem anderen mittels einer Modulationseinrichtung, beispiels-  
25 weise einem akustooptischen Modulator, in seiner Licht-Phase oder Licht-Fre-  
quenz verschoben wird. Einer der beiden Teilstrahlen durchläuft in dem Modula-  
tionsinterferometer ein Verzögerungselement, das eine optische Wegdifferenz  
der beiden Teilstrahlen erzeugt, die größer ist als die Kohärenzlänge der kurzkoh-  
ärenten Strahlung. In der Messsonde wird in einem Messzweig bezüglich eines

5 Referenzzweigs eine weitere optische Wegdifferenz in der Weise erzeugt, dass die durch das Verzögerungselement bewirkte Wegdifferenz kompensiert wird und somit eine Interferenz der von der Referenzebene des Referenzzweigs kommenden Referenzstrahlung und der von der Objektoberfläche in dem Messzweig zurückkommenden Strahlung entsteht, die nachfolgend ausgewertet wird, um  
10 die gewünschte Oberflächeneigenschaft (Form, Rauigkeit, Abstand) über eine Phasenauswertung zu ermitteln. In der Messsonde sind der Messzweig und der Referenzzweig bei einem Ausführungsbeispiel in einem gemeinsamen Lichtweg (common path) angeordnet, wobei zum Bilden des Messzweiges und des Referenzzweiges ein teildurchlässiges optisches Element vorgesehen ist.

15 Eine ähnliche interferometrische Messeinrichtung mit einem derartigen Modulationsferometer und einer daran über eine Lichtleitfaseranordnung angeschlossenen Messsonde ist auch in der DE 198 08 273 A1 angegeben, wobei mittels einer Empfängervorrichtung in einer Strahlzerlegungs- und Strahlempfangseinheit  
20 eine Aufspaltung der zur Interferenz gebrachten Strahlung in Strahlungsanteile unterschiedlicher Wellenlängen erfolgt, um daraus eine synthetische Wellenlänge zu bilden und den Messbereich (Eindeutigkeitsbereich) zu vergrößern.

25 Bei den vorstehend genannten interferometrischen Messeinrichtungen, die auf dem Prinzip der Heterodyninterferometrie beruhen, aber die Eigenschaften einer breitbandigen, kurzkohärenten Strahlung ausnutzen, weist das als Mach-Zehnder-Interferometer ausgebildete Modulationsinterferometer eine Anordnung klassischer optischer Bauteile auf, wie eine vor dem eingangsseitigen Strahlteiler liegende Kollimationsoptik, den eingangsseitigen und ausgangsseitigen Strahlteiler

5 und Umlenkspiegel. Die Teilstrahlen erfahren dabei mehrere Reflexionen an den Strahlteilerflächen und an den Spiegeln, bevor sie in die optische Lichtleiterfaseranordnung eingekoppelt werden. Die optischen Bauelemente müssen mit hoher Genauigkeit positioniert werden, da jeder Winkelfehler sich bei der Reflexion doppelt auswirkt. Dabei ist eine dauerhafte Justierung schwer sicher zu stellen.  
10 Auch im Zusammenhang mit der Einfügung einer Glasplatte zum Ausgleich von optischen Unsymmetrien können sich zusätzliche Schwierigkeiten bei der Justierung ergeben. Mit diesen Schwierigkeiten ist ein aufwendiger Aufbau verbunden, wobei außerdem eine genaue Anpassung an die Eigenschaften der Messsonde erforderlich ist.

15 Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine interferometrische Messeinrichtung der eingangs genannten Art bereitzustellen, die mit vereinfachtem Aufbau eine möglichst hohe Messgenauigkeit erreichen lässt.

#### 20 Vorteile der Erfindung

Diese Aufgabe wird mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Hiernach ist vorgesehen, dass der teildurchlässige Bereich mittels einer bezüglich der optischen Sondenachse unter einem Austrittswinkel schrägen Austrittsfläche  
25 einer Sondenfaser und einer ebenfalls bezüglich der optischen Sondenachse unter einem Eintrittswinkel schrägen Eintrittsfläche eines objektseitig folgenden Faserabschnitts gebildet ist, wobei zwischen der Austrittsfläche und der Eintrittsfläche ein keilförmiger Spalt gebildet ist.

5 Mit diesen Maßnahmen ergibt sich ein ähnlicher Effekt wie mit einer teildurchlässigen bzw. teilreflektierenden Beschichtung in dem teildurchlässigen Bereich. Durch die Schrägflächen in Verbindung mit der numerischen Apertur können dabei die Eigenschaften der zu der Oberfläche des Messobjektes durchgelassenen und von dieser kommenden sowie der in dem teildurchlässigen Bereich reflektierten Strahlungsanteile in geeigneter Weise zum Erzielen optimal auswertbarer Interferenzmuster beeinflusst werden.

15 Zu einer möglichst guten Funktion tragen dabei die Maßnahmen bei, dass die Austrittsfläche und die Eintrittsfläche in gleicher Richtung bezüglich der Sondenachse geneigt sind, sowie weiterhin die Maßnahmen, dass der Austrittswinkel und der Eintrittswinkel so gewählt sind, dass eine Fresnel-Reflexion bewirkt wird.

20 Eine für die Funktion vorteilhafte Ausgestaltung besteht darin, dass der Austrittswinkel  $\alpha$  zwischen  $5^\circ$  und  $8^\circ$  und der Eintrittswinkel zwischen  $\alpha$  und  $0^\circ$  beträgt.

25 Der Aufbau und die Justierung werden dadurch begünstigt, dass die Sondenfaser und der Faserabschnitt in einer röhrenförmigen Aufnahme axial ausgerichtet aufgenommen sind, die von einem äußeren Tubus der Messsonde umgeben ist.

Die Maßnahmen, dass auf der von dem Messobjekt abgelegenen Stirnseite der Aufnahme ein die Sondenfaser umgebenden, ebenfalls zu dem Tubus konzen-

5 trisch aufgenommenes Positionierstück vorgesehen ist und dass der Faserabschnitt in dem objektseitigen, vorderen Teil der Aufnahme und die Sondenfaser in dem objektabgelegenen, hinteren Teil der Aufnahme und/oder dem Tubus fixiert ist, begünstigen den Aufbau und eine genaue Justierung, wie auch die weiteren Maßnahmen, dass der vordere Teil der Aufnahme von dem hinteren  
10 Teil der Aufnahme durch diametral gegenüberliegende Spalte getrennt ist, wobei der eine Spalte rückseitig in Verlängerung der schrägen Austrittsfläche der Sondenfaser und der andere Spalt vorderseitig in der Verlängerung der schrägen Eintrittsfläche begrenzt sind, und dass der vordere Teil und der hintere Teil der Aufnahme von einem gemeinsamen hülsenförmigen Haltering umgeben sind, der  
15 auf seiner Außenseite von dem Tubus umgeben ist.

Für den Aufbau und die Funktionsweise sind weiterhin die Maßnahmen vorteilhaft, dass ein vorderer Abschnitt des Faserabschnittes gegenüber dessen hinterem Abschnitt einen geringeren Durchmesser besitzt. Eine genaue Messung  
20 wird dadurch unterstützt, dass eine objektseitige Austrittsfläche des Faserabschnittes unter einem Austrittswinkel von mindestens  $46^\circ$  gegenüber der Achsnormalen geneigt ist. Durch die Wahl der Neigung der objektseitigen Austrittsfläche kann das Messergebnis ebenfalls günstig beeinflusst werden.

25 Zu einem vorteilhaften Aufbau tragen weiterhin die Maßnahmen bei, dass das Modulationsinterferometer zumindest teilweise eine polarisationserhaltende lichtleitende Struktur in Form eines optischen Faserleiters oder einer integrierten Optik aufweist, wobei die lichtleitende Struktur zumindest eines Arms aufgetrennt ist.



## 5      Zeichnung

Die Erfindung wird nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

10      Fig. 1 eine schematische Darstellung eines Gesamtaufbaus einer interferometrischen Messeinrichtung mit Modulationsinterferometer und Messsonde,

15      Fig. 2 eine nähere Ausgestaltung des in Fig. 1 gezeigten Modulationsinterferometers,

Fig. 3 die Messsonde und das Messobjekt in seitlicher Ansicht mit Darstellung des Strahlungsversatzes,

20      Fig. 4 eine schematische Darstellung eines Faserteils der Messsonde in seitlicher Ansicht,

Fig. 5 den vorderen Abschnitt der Messsonde in schematischer seitlicher Darstellung und

25      Fig. 6 ein weiteres Ausführungsbeispiel des vorderen Abschnittes der Messsonde in schematischer seitlicher Darstellung.

## Ausführungsbeispiel

Wie Fig. 1 zeigt, weist die auf dem Prinzip der Heterodyninterferometrie beruhende interferometrische Messeinrichtung eine breitbandige, kurzkohärente Lichtquelle 1 auf, deren Strahlung einem sogenannten Modulationsinterferometer 2 zugeführt wird. In dem Modulationsinterferometer 2, das in Fig. 2 näher dargestellt ist, wird die Strahlung  $s(t)$  an einem ersten Strahlteiler 2.3 in einen über einen ersten Arm geführten ersten Teilstrahl 2.1 mit einer Teilstrahlung  $s_1(t)$  und einen über einen zweiten Arm geführten zweiten Teilstrahl 2.1' mit einer Teilstrahlung  $s_2(t)$  aufgeteilt und ausgangsseitig an einem weiteren Strahlteiler 2.10 wieder zusammengeführt und von dort über eine Lichtleitfaseranordnung 6 in eine entfernte Messsonde 3 geleitet. Von der Messsonde 3, die z.B. als Fizeau-Interferometer oder Mirau-Interferometer aufgebaut ist, wie in den eingangs genannten Druckschriften näher erläutert, gelangt die Strahlung anschließend über eine weitere Lichtleitfaseranordnung 7 in eine Empfängervorrichtung 4 mit einer Strahlzerlegungseinheit 4.1 und anschließenden photoelektrischen Empfängern 4.2, in denen eine Umwandlung in elektrische Signale erfolgt. In einer anschließenden Auswerteeinheit 5 mit Phasendetektor 5.1 und Recheneinheit 5.2 werden dann die mittels der Messsonde 3 aufgenommenen Eigenschaften der Messoberfläche (z.B. Rauigkeit, Form, Abstände) ermittelt.

Das Modulationsinterferometer 2 ist als Mach-Zehnder-Interferometer aufgebaut, wobei die beiden Arme im Anschluss an den ersten Strahlteiler 2.3 erste bzw. zweite eingangsseitige Lichtleitfasern 2.11, 2.11' und erste bzw. zweite ausgangsseitige Lichtleitfasern 2.12, 2.12' aufweisen, die zu dem weiteren Strahl-

5 teiler 2.10 führen. Der erste Strahlteiler 2.3 ist dabei in einem Faserlichtleiter ausgebildet, mit dem die von der Lichtquelle 1 kommende Strahlung herangeführt wird. Am Ausgang des so gebildeten Kopplers werden die Teilstrahlen mittels linsenartiger Koppellemente 2.4, 2.4' kollimiert, und die beiden kollimierten Teilstrahlen durchlaufen eine erste bzw. zweite Modulationseinheit  
10 2.2, 2.2', beispielsweise in Form eines akustooptischen Modulators, eines faseroptischen Piezomodulators oder eines thermischen Phasenmodulators, wobei die Modulationseinheiten 2.2, 2.2' vorteilhaft auch als integrierte optische Bauteile ausgebildet sein können. Um die chromatische Dispersion zu korrigieren, durchläuft zumindest einer der Teilstrahlen 2.1, 2.1' eine Glasplatte 2.7',  
15 die in einer ersten bzw. zweiten Lichtstrecke 2.5, 2.5' angeordnet ist. Die Wahl zur Anordnung der Glasplatte 2.7' und/oder auch deren Dicke bestimmt sich durch Rechnung. Im weiteren Verlauf werden der erste Teilstrahl 2.1 und der zweite Teilstrahl 2.1' auf ein erstes bzw. zweites linsenartiges Lichtleitelement 2.6, 2.6' geleitet und in die erste bzw. zweite ausgangsseitige Lichtleitfaser  
20 2.12, 2.12' eingekoppelt. Die erste oder die zweite ausgangsseitige Lichtleitfaser 2.12, 2.12' besitzt eine größere optische Weglänge als die andere Lichtleitfaser in dem Ausmaß, dass der optische Wegunterschied  $\Delta L = L_2 - L_1$  zwischen den beiden Armen größer ist als die Kohärenzlänge der kurzkohärenten Strahlung  $s(t)$  nach Durchlaufen der Filter 4.3 und 4.3'. Eines der linsenartigen  
25 Koppellemente 2.4, 2.4' oder der Lichtleitelemente 2.6, 2.6', beispielsweise das Lichtleitelement 2.6' kann an einer Justiervorrichtung befestigt sein, mit der die optische Wegdifferenz  $\Delta L$  von Hand oder mit einem Motor z.B. unter Benutzung eines Mikrometertisches in der Weise verstellt werden kann, dass die Wegdifferenz  $\Delta L$  zwischen den beiden Armen auf diejenige der Messsonde 3 abge-

stimmt wird, um mit der Messsonde 3 eine Interferenz zu bewirken. Die ver-  
wendeten Lichtleitphasern 2.11, 2.11', 2.12, 2.12' sind monomod. Außerdem  
sind sie vorteilhafterweise polarisationserhaltend, insbesondere, wenn die  
Lichtquelle 1 polarisiert ist und/oder wenn die Modulationseinheiten 2.2, 2.2'  
aus doppelbrechenden Kristallen gebildet sind und/oder wenn die Montage an  
den Koppelstellen keine befriedigende Stabilität bezüglich der Polarisations-  
richtungen in den beiden Interferometerarmen ergibt. Zum Erzielen der optischen  
Wegdifferenz ist beispielsweise in der zweiten ausgangsseitigen Lichtleitfaser  
2.12' ein optischer Umweg 2.9' vorgesehen.

Die zum Aufnehmen der Objektoberfläche dienende Sonde 3, die beispielsweise  
als Fizeau-Interferometer oder Mirau-Interferometer aufgebaut ist, weist einen  
Referenzzweig mit einer Referenzebene und einen zu der Objektoberfläche füh-  
renden Messzweig auf, deren optischen Wegdifferenzen so gewählt sind, dass  
die in dem Modulationsinterferometer 2 erzeugte optische Wegdifferenz kom-  
pensiert wird, so dass der von der Objektoberfläche kommende Messstrahl und  
der von der Referenzebene kommende Referenzstrahl bei ihrer Überlagerung in-  
terferieren. Die interferierende Strahlung wird zur spektralen Aufteilung in  
Anteile unterschiedlicher Wellenlängen der Strahlzerlegungseinheit 4.1 und  
anschließend den zugeordneten photoelektrischen Empfängern 4.2 zugeführt.  
Aus der interferierenden Strahlung und den daraus gewonnen elektrischen Sig-  
nalen wird durch Auswertung der Phasendifferenzen die gewünschte Oberflä-  
cheneigenschaft mittels des Phasendetektors 5.1 und der anschließenden  
Recheneinheit 5.2 ermittelt. Dabei entsteht die ausgewertete Phasendifferenz  
durch die mit der ersten und/ oder zweiten Modulationseinheit 2.2, 2.2' erzeugte  
Frequenzdifferenz, die entsprechend dem Heterodynverfahren bezogen auf die

5 Grundfrequenz relativ gering ist. Die Berechnung erfolgt aufgrund der Beziehung:

$$\Delta\varphi = 2\pi \cdot (2e / \Lambda) + \varphi_0$$

wobei

10  $\varphi_0$  eine Konstante,

$\Lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1)$  synthetische Wellenlänge der Messvorrichtung

$\lambda_1$  Wellenlänge an einem ersten photoelektrischen Empfänger

$\lambda_2$  Wellenlänge an einem zweiten photoelektrischen Empfänger

e Messabstand

15 sind. Daraus wird mittels der Auswerteeinheit 5 der jeweils erfasste Abstand der Oberfläche an einer Messstelle bestimmt aus der Beziehung:

$$e = \Delta\varphi / (2\pi) \cdot (\Lambda/2).$$

20 Das Abstandsmaß e wird also bestimmt aus einer Messung der Phase zwischen zwei elektrischen Signalen, wodurch die Messung unabhängig von der durch die Photodioden empfangenen optischen Intensität ist.

25 Fig. 3 zeigt einen Faserteil der Messsonde, ausgeführt als Mirau-Interferometer mit einer monomoden Lichtleitfaser, und die Wegverschiebungen der ankommenden  $s_2(t)$  und  $s_1(t)$  sowie der von der Oberfläche des Messobjektes 8 und einem teildurchlässigen Bereich 3.3 zwischen einer objektseitigen Austrittsfläche 3.31 einer Sondenfaser 3.1 und einer objektabgelegenen Eintrittsfläche 3.32 eines Faserabschnittes 3.2 zurücklaufenden Strahlungsanteile  $r_1'(t)$ ,  $r_1(t)$ ,  $r_2(t)$  und

5  $r_2'(t)$ . Die zurücklaufenden Strahlungsanteile  $r_1'(t)$  und  $r_1(t)$  ergeben sich dabei aus derjenigen Strahlung  $s_1(t)$ , die den Zweig des Modulationsinterferometers 2 ohne Umweg durchlaufen haben, wobei der Strahlungsanteil  $r_1'(t)$  von dem teildurchlässigen Bereich 3.3 und der Strahlungsanteil  $r_1(t)$  von der Oberfläche des Messobjektes 8 reflektiert werden. Die zurücklaufenden Strahlungsanteile  $r_2(t)$  und  $r_2'(t)$  hingegen ergeben sich aus derjenigen Strahlung  $s_2(t)$  des Modulationsinterferometers 2, die den optischen Umweg durchlaufen hat, wobei der zurücklaufende Strahlungsanteil  $r_2(t)$  an dem teildurchlässigen Bereich 3.3 und der zurücklaufende Strahlungsanteil  $r_2'(t)$  an der Oberfläche des Messobjektes 8 reflektiert worden ist. Es zeigt sich, dass entsprechend der Kompensation der in dem Modulationsinterferometer 2 gebildeten Wegdifferenz  $\Delta L$  durch die Messsonde 3 lediglich die zurücklaufenden Strahlungsanteile  $r_1(t)$  und  $r_2(t)$  innerhalb der Kohärenzlänge liegen und miteinander interferieren.

20 Die objektseitige Austrittsfläche 3.4 des Faserabschnittes 3.2 ist bei dem Ausführungsbeispiel nach Fig. 3 vorzugsweise unter einem Winkel von  $45^\circ$  bezüglich der optischen Sondenachse 3.5 geneigt. Auf der Austrittsfläche 3.4 ist eine reflektierende metallische oder dielektrische Beschichtung aufgebracht. Die Strahlung wird auf diese Weise im Wesentlichen rechtwinklig abgelenkt und auf die umgebende Oberfläche des Objekts gelenkt und die von der Oberfläche reflektierte Strahlung tritt über die Austrittsfläche 3.4 wieder in die Lichtleitfaser ein.

30 Wie die Fig. 4 bis 6 zeigen, ist der teildurchlässige Bereich 3.3 zwischen der Austrittsfläche 3.31 der Sondenfaser 3.1 und der Eintrittsfläche 3.32 des Faserabschnittes 3.2 durch eine Neigung der Austrittsfläche 3.31 um einen Winkel

5  $\alpha$  bezüglich der Normalen der Sondenachse 3.5 und durch eine Neigung der Eintrittsfläche 3.32 des Faserabschnittes 3.2 um einen Winkel  $\beta$  bezüglich der Normalen der Sondenachse 3.5 gebildet, wobei der Winkel  $\alpha$  größer ist als der Winkel  $\beta$  und sich ein keilförmiger Spalt zwischen der Austrittsfläche 3.31 und der Eintrittsfläche 3.32 ergibt. Die Ausrichtung der Neigung bezüglich der  
10 Normalen ist bei der Austrittsfläche 3.31 und der Eintrittsfläche 3.32 im Längsschnitt in gleicher Weise zum Objekt hin orientiert. Der Winkel  $\alpha$  der Austrittsfläche 3.31 ist so gewählt, dass der Strahlungsstrom der Fresnel-Reflexion auf der Austrittsfläche 3.31 nicht durch die Sondenfaser 3.1 geführt wird. Für eine monomode Lichtleitfaser mit einer numerischen Apertur von  
15 0,12 beträgt der Winkel  $\alpha$  vorteilhaft etwa  $6^\circ$ . Der Winkel  $\beta$  ist so gewählt, dass der Strahlungsstrom der Fresnel-Reflexion auf die Eintrittsfläche 3.32 des Faserabschnittes 3.2 durch die Sondenfaser 3.1 geführt wird, wobei das Ausmaß des Strahlungsstromes berücksichtigt wird, das in die Sondenfaser 3.1 eingekoppelt werden soll. Wenn der Winkel  $\beta$  gleich 0 ist, beträgt die Kopp-  
20 plungsrate etwa 3,6 %. Wenn der Winkel  $\beta$  gegen den Winkel  $\alpha$  geht, strebt der Kopplungsgrad gegen 0. Wenn der Winkel  $\beta$  gegen den Winkel  $\alpha$  strebt, geht die Transmission für diesen Übergang und eine zurückkehrende Strahlung gegen 86 %. Ist hingegen der Winkel  $\beta$  gleich 0, beträgt die Transmission etwa 60 %. Eine numerische Apertur von 0,12 ergibt sich z.B. bei einer Wellenlänge von  
25 1.550 nm und einem Durchmesser von  $10,4 \mu\text{m}$ . Der Winkel  $\alpha$  sollte nicht kleiner als etwa  $5^\circ$  gewählt werden.

Die Reflexionsbehandlung der Austrittsfläche 3.4 des Faserabschnittes 3.2 kann verringert oder vermieden werden, wenn der Austrittswinkel  $\gamma$  zum Erreichen  
30 einer Totalreflexion an der Austrittsfläche 7 vergrößert wird. Dies ist z.B. bei

5 einer monomodalen Lichtleitfaser mit einer numerischen Apertur von 0,12 bei einem Austrittswinkel  $\gamma$  oberhalb von  $48^\circ$  der Fall.

Auf dem objektseitigen Endbereich des Faserabschnittes 3.2 kann auf der Außenbehandlung (cladding) eine Antireflexionsbehandlung 3.22 vorgenommen  
10 werden, um die Empfindlichkeit gegenüber der Fresnel-Reflexion zu verringern oder der Austrittswinkel  $\gamma$  kann soweit vergrößert werden, dass der Strahlungsstrom dieser Reflexion nicht mehr in den Faserabschnitt 3.2 eingekoppelt wird.

15 Wie Fig. 5 zeigt, können die Sondenfaser 3.1 und der Faserabschnitt 3.2 in derselben röhrenartigen Aufnahme 3.6 aufgenommen und in Kontakt gebracht werden. Die Aufnahme 3.6 ist die gleiche, wie sie für Verbinder monomoder Lichtleitfasern verwendet wird. Die Aufnahme 3.6 ist in einen sie umgebenden Tubus 3.9 der Messsonde 3 eingesetzt. Im Inneren des Tubus 3.9 befindet sich  
20 auf der objektabgelegenen Stirnseite der Aufnahme 3.6 anschließend ferner ein Positionierstück 7 für die Führung und Vorjustierung der Sondenfaser 3.1. Der Faserabschnitt 3.2 ist im Inneren der Aufnahme mittels Klebers 3.8' fixiert, während die Sondenfaser 3.1 in der Aufnahme 3.6 und/oder dem Positionierstück 3.7 mittels Klebers 3.8 fixiert ist.

25 Eine andere Vorgehensweise zum Ausrichten und Festlegen der Sondenfaser 3.1 und des Faserabschnittes 3.2 in der Sonde 3 ist in Fig. 6 gezeigt. Die Sondenfaser 3.1 wird in einen hinteren Abschnitt 3.6' der röhrenförmigen Aufnahme 3.6 eingeführt und die vordere Stirnseite des Aufnahmenabschnittes 3.6'



5 und der Austrittsfläche 3.31 der Sondenfaser 3.1 werden im gewünschten Winkel poliert, wobei die vordere Stirnseite im Bereich der vordersten Kante der Sondenfaser 3.1 normal zur optischen Achse 3.5 der Sondenfaser 3.1 gerichtet ist. Entsprechend wird die hintere Stirnseite eines vorderen Abschnittes 3.6" der Aufnahme 3.6 entsprechend der gewünschten Eintrittsfläche 3.32 des Faserabschnittes 3.2 poliert, wobei der an den hintersten Rand des Faserabschnittes 3.2  
10 angrenzende Bereich der hinteren Stirnseite des vorderen Abschnittes 3.6" der Aufnahme 3.6 normal zur optischen Achse 3.5 der Sondenfaser 3.1 ausgerichtet ist. Zwischen dem hinteren Abschnitt 3.6' und dem vorderen Abschnitt 3.6" der Aufnahme 3.6 ergibt sich dabei im Längsschnitt die in Fig. 6 gezeigte Anordnung. Die beiden Abschnitte 3.6' und 3.6" der Aufnahme 3.6 werden zueinander mit einem aufgebrachten, z.B. geschlitzten Haltering 3.10 axial ausgerichtet und in den Tubus 3.9 eingesetzt. In dem Tubus 3.9 ist desweiteren  
15 wiederum an die hintere Stirnseite der Aufnahme 3.6 angrenzend ein konzentrisches Positionierstück 3.7 zum Justieren und Vorfixieren der Sondenfaser 3.1 eingesetzt, wie bei dem Ausführungsbeispiel nach Fig. 5. Auch die Fixierung der Sondenfaser 3.1 und des Faserabschnittes 3.2 mittels Klebers 3.8, 3.8' erfolgt entsprechend dem Ausführungsbeispiel nach Fig. 5, wobei der Faserabschnitt 3.6 in dem vorderen Abschnitt 3.6" der Aufnahme 3.6 festgelegt wird.

25 Es ist auch möglich, die Abschnitte 3.6' und 3.6" der Aufnahme 3.6 dadurch auszurichten, dass sie in ein V-förmiges Profil eingebracht werden. Dadurch, dass die beiden Abschnitte 3.6', 3.6" der Aufnahme 3.6 getrennt eingebracht werden, kann das äußerste Ende der Messsonde 3 unbeweglich und entspre-

5 chend der Eigenschaft des Messobjektes geändert werden, wobei dieselbe Son-  
denfaser 3.1 beibehalten wird.

Wie die Fig. 4 bis 6 desweiteren zeigen, ist der äußere Abschnitt des Faser-  
abschnittes 3.2 in seinem Durchmesser reduziert, so dass er auch in enge  
10 Löcher eines Messobjektes 8 eingeführt werden kann, deren Durchmesser we-  
niger als  $130\ \mu\text{m}$  beträgt. Üblicherweise beträgt der Durchmesser einer mono-  
moden Lichtleitfaser mit Außenbehandlung (cladding)  $125\ \mu\text{m}$ . Der Durchmesser  
kann mittels chemischer Behandlung mit einer entsprechenden Säure oder Hitze-  
behandlung verringert werden, um eine gewünschte Verjüngung 3.21 zu erhal-  
15 ten. Die antireflektierende Behandlung 3.22 ist dann im Bereich des Abschnittes  
geringeren Durchmessers vorgenommen. Auch diese Maßnahmen tragen dazu  
bei, zuverlässige Messungen auch in engen Vertiefungen eines Messobjektes 8  
vornehmen zu können.

## Ansprüche

1. Interferometrische Messvorrichtung zum Erfassen der Form, der Rauheit oder des Abstandes der Oberfläche eines Messobjektes (8) mit einem Modulationsinterferometer (2), dem von einer Strahlungsquelle (1) kurzkohärente Strahlung zugeführt wird und das einen ersten Strahlteiler (2.3) zum Aufteilen der zugeführten Strahlung in einen über einen ersten Arm geführten ersten Teilstrahl (2.1) und einen über einen zweiten Arm geführten zweiten Teilstrahl (2.1') aufweist, von denen der eine gegenüber dem anderen mittels einer Modulationseinrichtung (2.2, 2.2') in seiner Licht-Phase oder Lichtfrequenz verschoben wird und eine Verzögerungsstrecke (2.9') durchläuft, und die anschließend an einem weiteren Strahlteiler (2.10) des Modulationsinterferometers (2) vereinigt werden, mit einer von dem Modulationsinterferometer (2) räumlich getrennten und mit dieser über eine Lichtleitfaseranordnung (6) gekoppelten oder koppelbaren Messsonde (3), in der die vereinigten Teilstrahlen in einem gemeinsamen Arm in einem teildurchlässigen Bereich (3.3) in einen Messstrahl und einen Referenzstrahl aufgeteilt und in der der an der Oberfläche re-

5 flektierte Messstrahl ( $r_1(t)$ ) und der an einer Referenzebene reflektierte Referenzstrahl ( $r_2(t)$ ) überlagert werden, und mit einer Empfängervorrichtung (4) und einer Auswerteeinheit (5) zum Umwandeln der ihr zugeleiteten Strahlung in elektrische Signale und zum Auswerten der Signale auf der Grundlage einer Phasendifferenz,

10 dadurch gekennzeichnet,

dass der teildurchlässige Bereich (3.3) mittels einer bezüglich der optischen Sondenachse (3.5) unter einem Austrittswinkel ( $\alpha$ ) schrägen Austrittsfläche (3.31) einer Sondenfaser (3.1) und einer ebenfalls bezüglich der optischen Sondenachse (3.5) unter einem Eintrittswinkel ( $\beta$ ) schrägen Eintrittsfläche (3.32) eines objektseitig folgenden Faserabschnitts (3.2) gebildet ist, wobei zwischen der Austrittsfläche (3.31) und der Eintrittsfläche (3.32) ein keilförmiger Spalt gebildet ist.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1,

20 dadurch gekennzeichnet,

dass die Austrittsfläche (3.31) und die Eintrittsfläche (3.32) in gleicher Richtung bezüglich der Sondenachse (3.5) geneigt sind.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2,

25 dadurch gekennzeichnet,

dass der Austrittswinkel ( $\alpha$ ) und der Eintrittswinkel ( $\beta$ ) so gewählt sind, dass eine Fresnel-Reflexion bewirkt wird.

4. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

30 dadurch gekennzeichnet,

5 dass der Austrittswinkel ( $\alpha$ ) zwischen  $5^\circ$  und  $8^\circ$  und der Eintrittswinkel ( $\beta$ ) zwischen  $\alpha$  und  $0^\circ$  beträgt.

5. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
dadurch gekennzeichnet,

10 dass die Sondenfaser (3.1) und der Faserabschnitt (3.2) in einer röhrenförmigen Aufnahme (3.6; 3.6', 3.6'') axial ausgerichtet aufgenommen sind, die von einem äußeren Tubus (3.9) der Messsonde (3) umgeben ist.

15 6. Vorrichtung nach Anspruch 5,  
dadurch gekennzeichnet,

20 dass auf der von dem Messobjekt (8) abgelegenen Stirnseite der Aufnahme (3.6; 3.6') ein die Sondenfaser (3.1) umgebendes, ebenfalls zu dem Tubus (3.9) konzentrisch aufgenommenes Positionierstück (3.7) vorgesehen ist und

dass der Faserabschnitt (3.2) in dem objektseitigen, vorderen Teil der Aufnahme (3.6; 3.6'') und die Sondenfaser (3.1) in dem objektabgelegenen, hinteren Teil der Aufnahme (3.6; 3.6') und/oder dem Tubus (3.9) fixiert ist.

25 7. Vorrichtung nach Anspruch 6,  
dadurch gekennzeichnet,

dass der vordere Teil der Aufnahme (3.6'') von dem hinteren Teil der Aufnahme (3.6') durch diametral gegenüberliegende Spalte (3.61, 3.62)

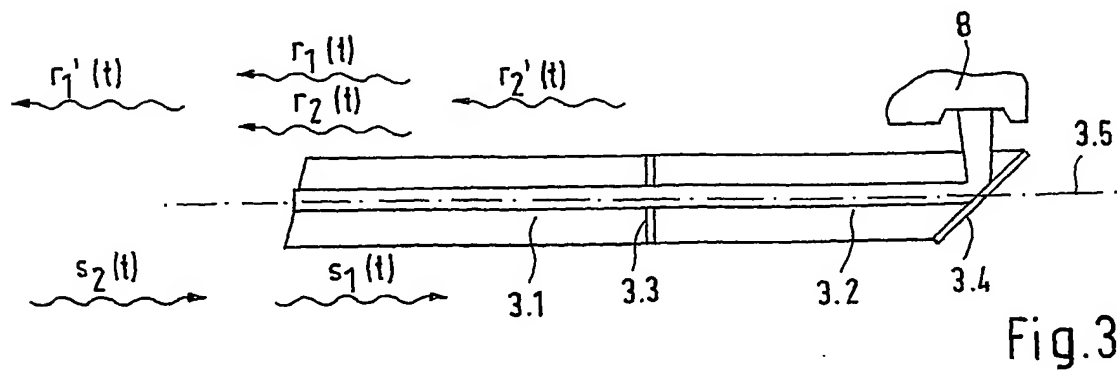
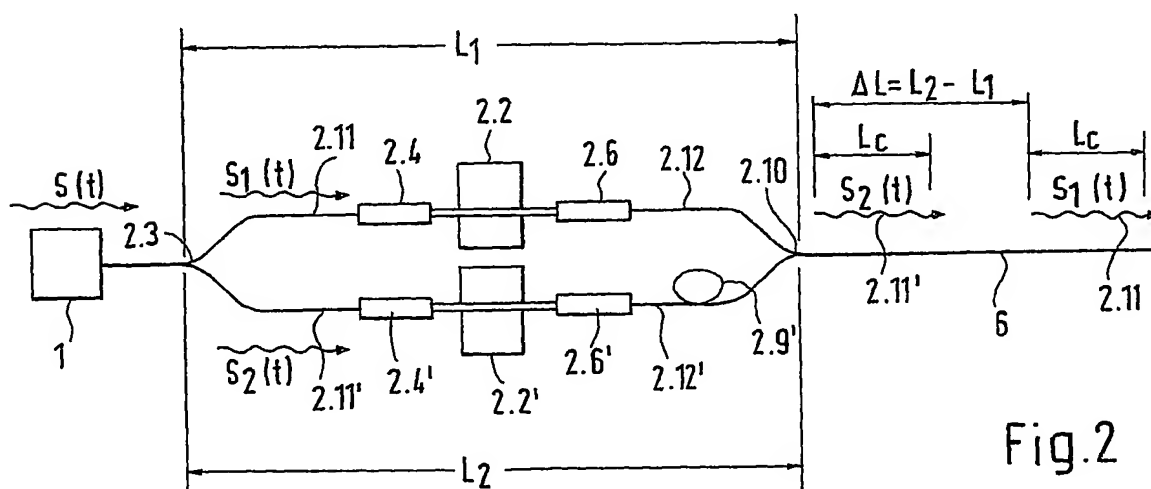
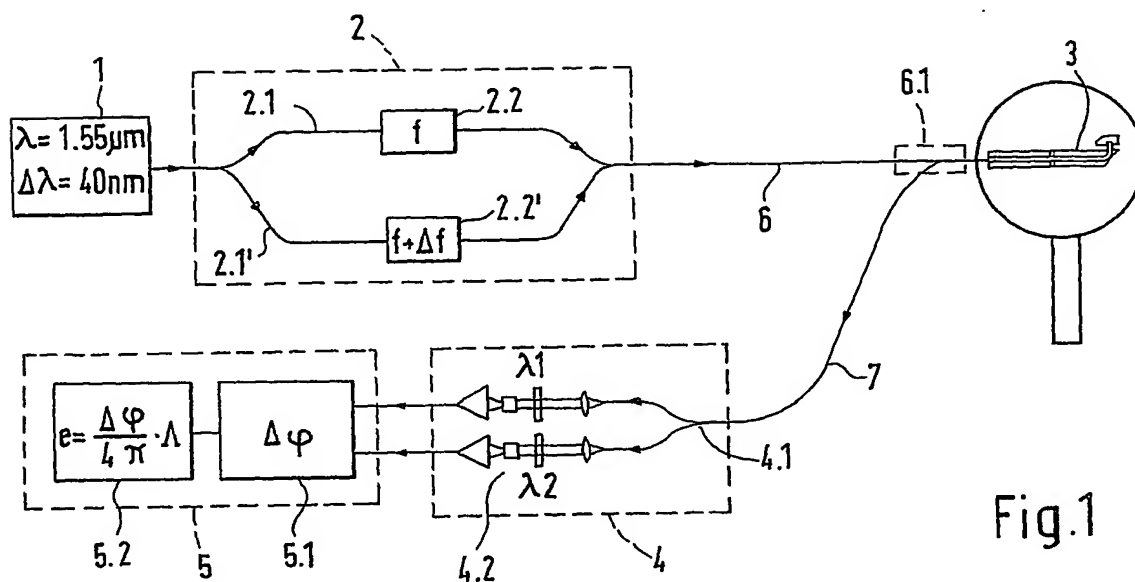
5           getrennt ist, wobei der eine Spalte (3.61) rückseitig in Verlängerung der  
schrägen Austrittsfläche (3.31) der Sondenfaser (3.1) und der andere  
Spalt (3.62) vorderseitig in der Verlängerung der schrägen Eintrittsfläche  
(3.32) begrenzt sind, und  
dass der vordere Teil (3.6'') und der hintere Teil (3.6') der Aufnahme von  
10       einem gemeinsamen hülsenförmigen Haltering (3.10) umgeben sind, der  
auf seiner Außenseite von dem Tubus (3.9) umgeben ist.

8.       Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
dadurch gekennzeichnet,  
15       dass ein vorderer Abschnitt des Faserabschnittes (3.2) gegenüber dessen  
hinterem Abschnitt einen geringeren Durchmesser besitzt.

9.       Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
dadurch gekennzeichnet,  
20       dass eine objektseitige Austrittsfläche (3.4) des Faserabschnittes (3.2)  
unter einem Austrittswinkel ( $\gamma$ ) von mindestens  $46^\circ$  gegenüber der Achs-  
normalen geneigt ist.

10.      Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
25       dadurch gekennzeichnet,  
dass das Modulationsinterferometer (2) zumindest teilweise eine pola-  
risationserhaltende lichtleitende Struktur (2.11, 2.11', 2.12, 2.12') in  
Form eines optischen Faserleiters oder einer integrierten Optik aufweist,  
wobei die lichtleitende Struktur (2.11, 2.11' 2.12, 2.12') zumindest eines  
30       Arms aufgetrennt ist.

1/2



2/2

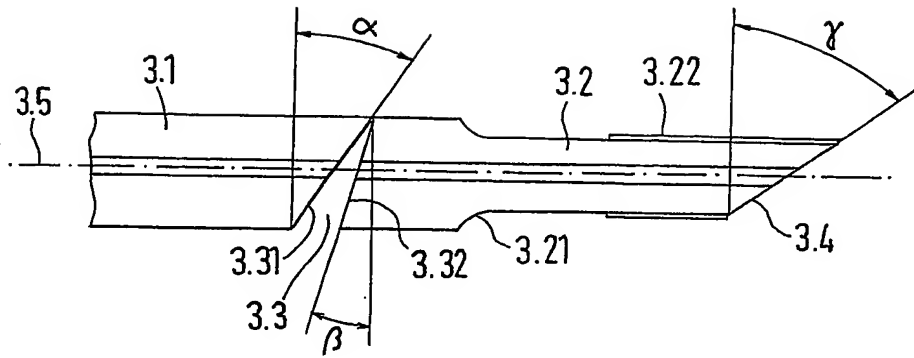


Fig. 4

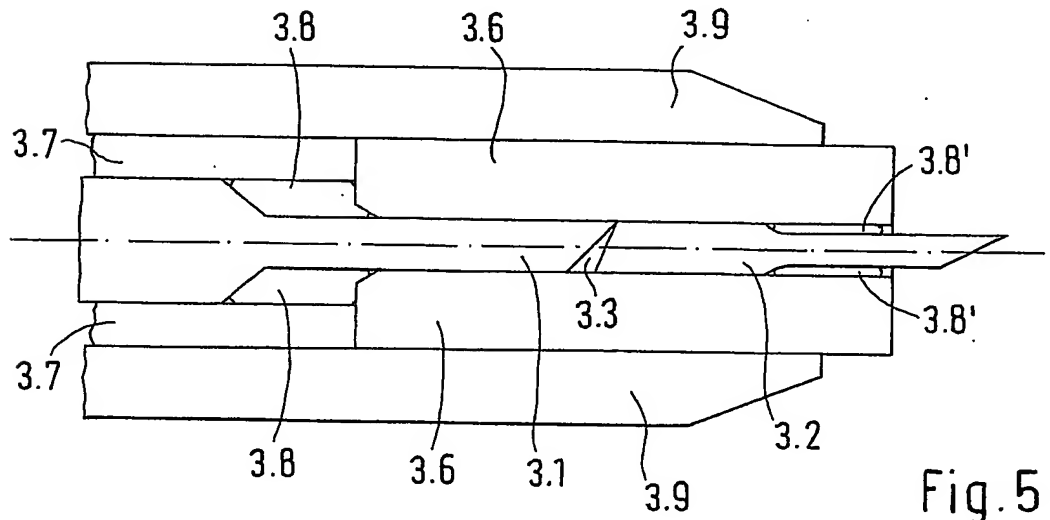


Fig. 5

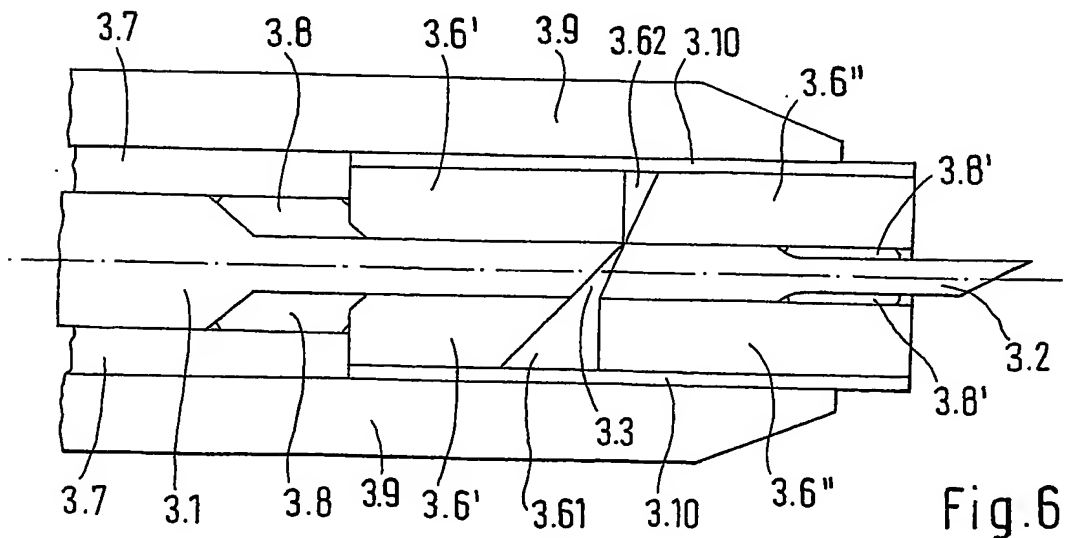


Fig. 6